

В.И. КОНДРАЩЕНКО, докт. техн. наук, проф.,

В.Д. КУДРЯВЦЕВА, научн. сотруду.,

А.В. КЕНДЮК, мл. научн. сотруду., **А.В. СЕМАК**, інженер,

Московский государственный университет путей сообщения, Россия

Е.В. КОНДРАЩЕНКО, докт. техн. наук, проф.,

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАКРОСТРУКТУРЫ БЕТОНА

Запропонована імітаційна модель бетону на макрорівні у вигляді двокомпонентної системи, що складається з матриці – цементно-піщаного каменю, і включень – зерен заповнювача, у вигляді опуклих багатокутників. На межі матриці і включень є контактна зона з відмінними від матриці і включень властивостями, а в об'ємі матеріалу (у матриці і включеннях) випадковим чином розташовані початкові дефекти структури – пори різних форм і розмірів. У важкому бетоні дефектністю включень нехтують і відносять її до зони контакту матриці з включеннями.

Предложена имитационная модель бетона на макроуровне в виде двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы – цементно-песчаного камня, и включений – зерен заполнителя, в виде выпуклых многоугольников. На границе матрицы и включений имеется контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала (в матрице и включениях) случайным образом расположены начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров. В тяжелом бетоне дефектностью включений пренебрегают и относят ее к зоне контакта матрицы с включениями.

The simulation model of concrete is offered on a macrolevel as a double-base system, consisting of matrix – cement-sandy stone, and including - grains of filler, as protuberant polygons. On the border of matrix and including there is a pin area with different from a matrix and including properties, and in the volume of material (in a matrix and including) casual character is locate the initial defects of structure pores of different forms and sizes. In a heavy concrete imperfectness of including is ignored and attribute her to the area of contact of matrix with including.

На современном этапе развития строительного материаловедения значительное место в изучении взаимосвязи структуры со свойствами материала особенностей материала с его свойствами занимает вычислительный эксперимент (ВЭ), позволяющий не только сократить продолжительность исследований и повысить их достоверность, но и получить в ряде случаев результаты, трудно достижимые в натурном эксперименте (НЭ) [1]. При этом возникает проблема построения достоверной структурно-имитационной модели (СИ-модели) материала, отражающей основные особенности его поведения

под нагрузкой того или иного рода. В частности, определение наиболее эффективных путей получения высокопрочного бетона на пористых заполнителях может быть выполнено ранжированием параметров макроструктуры бетона по степени их влияния на его прочность путем варьирования в расчетной модели-аналоге бетона по результатам проведения ВЭ.

Модель-аналог бетона представляет собой СИ-модель, имеющую геометрические (размеры образца, начальных дефектов (НД), включений и др.) и физические (модули упругости матрицы, включений, свойства контактной зоны (к.з.), и др.) параметры, близкие натурному образцу. В свою очередь образцы бетона и его компонентов на уровне макроструктуры моделируются пластиной единичной толщины, ширина A и высота H которой равны стандартным размерам образцов. Физическими параметрами матрицы бетона являются: модуль упругости E_m , коэффициент Пуассона μ_m , критические коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) при нормальном отрыве k_{ICm} и плоском сдвиге k_{IIcm} .

НД бетона и его компонентов на уровне макроструктуры – поры, моделируются круглыми отверстиями, на контур которых выходят две коллинеарные трещины, и имеют следующие геометрические параметры: радиус поры r_d , начальную длину трещин l_{0d} и их ориентацию α_d относительно нагрузки q , координаты дефектов на пластине x_d, y_d и их число N_d (рис. 1).

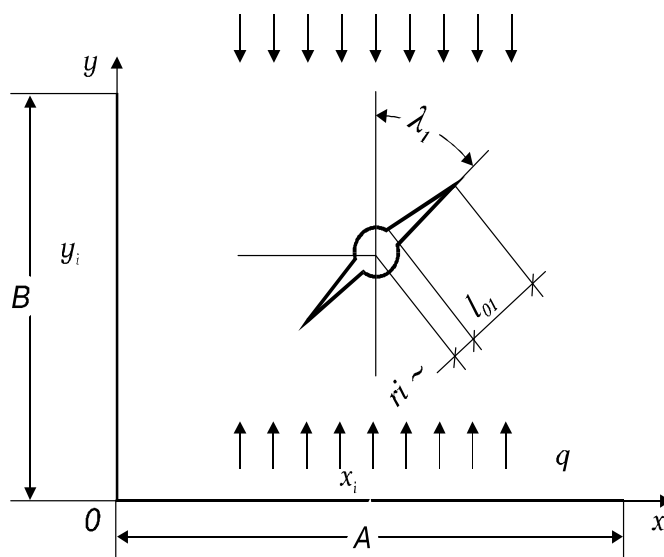


Рис. 1. Геометрические параметры НД макроструктуры бетона (пояснения в тексте)

Радиусы НД r_d в модели изменяются по заданному закону распределения пор по размерам. Начальная длина трещин l_{0d} фиксирована и составляет $l_{0d} = 0,184 r_d$ [2]. Ориентация НД относительно нагрузки q изменяется на ин-

тервале от 0 до 2π . Координаты центров *НД* x_{id} , y_{id} являются независимыми случайными величинами.

Включения моделируются выпуклыми многоугольниками и имеют следующие геометрические параметры (рис. 2): условный радиус $R_{\text{в}}$, число вершин $n_{\text{в}}$ и их угол $\theta_{\text{в}}$ относительно q , координаты центра $X_{\text{в}}$, $Y_{\text{в}}$, концентрацию $\varphi_{\text{в}}$ и коэффициент формы $\kappa_{\text{фв}}$ включений, а также физические параметры – модуль упругости $E_{\text{в}}$, коэффициент Пуассона $\mu_{\text{в}}$, критические *КИН* при нормальном отрыве $K_{\text{ИСв}}$ и плоском сдвиге $K_{\text{ИСв}}$.

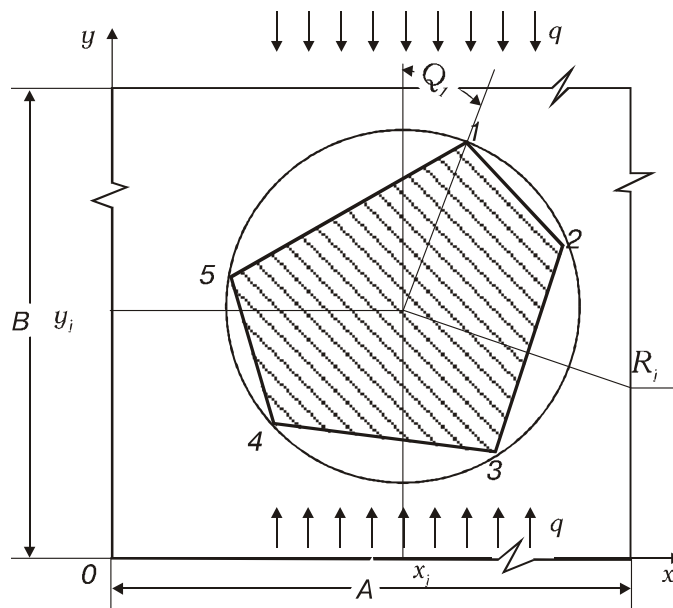


Рис. 2. Геометрические параметры включения (пояснения в тексте)

Условный радиус $R_{\text{в}}$, координаты центров $X_{\text{в}}$, $Y_{\text{в}}$, число вершин $n_{\text{в}}$ и их ориентация $\theta_{\text{в}}$, коэффициент формы $\kappa_{\text{фв}}$ ($\kappa_{\text{фв}} = L_{\text{max}}/L_{\text{min}}$ – рис. 3) включений изменяются случайным образом на интервалах соответственно $[R_{\text{вmin}}; R_{\text{вmax}}]$, $[A; H]$ [3;6], $[0; 2\pi]$ и $[\kappa_{\text{фmin}}; \kappa_{\text{фmax}}]$.

Концентрация включений в бетоне $\varphi_{\text{в}}$ является постоянной величиной. Значения физических параметров включений $E_{\text{в}}$, $\mu_{\text{в}}$, $K_{\text{ИСв}}$ и $K_{\text{ИСв}}$ являются случайными величинами, изменяющимися в соответствии с законом распределения средней плотности пористых заполнителей.

Стороны многоугольников моделируют *к.з.* включений. Ее геометрическим параметром является ширина $\delta_{\text{к}}$, а физическими параметрами – критические *КИН* при нормальном отрыве $k_{\text{ИСк}}$ и плоском сдвиге $k_{\text{ИСк}}$. Ширина *к.з.* $\delta_{\text{к}}$ (рис. 4) принимает постоянное или случайное значение.

Критические *КИН* для *к.з.* принимаются пропорционально аналогичным

параметрам для матрицы – $k_{ICk} = \Delta_m k_{ICm}$ и $k_{IICk} = \Delta_m k_{IICm}$, где Δ_m – коэффициент пропорциональности, являющийся случайной величиной и равной отношению микротвердости к.з. к микротвердости матрицы.

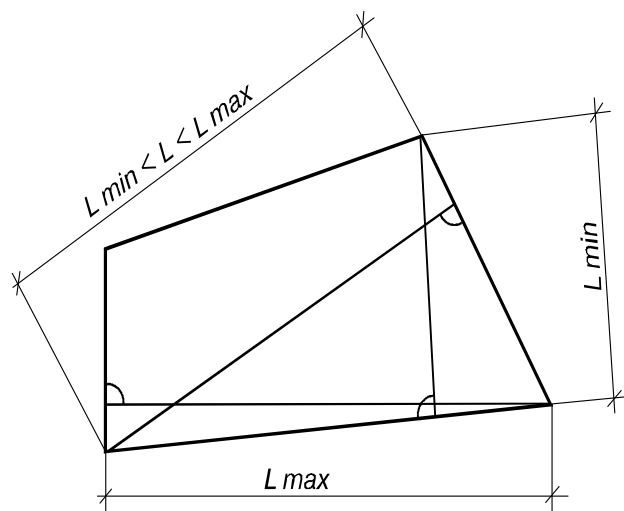


Рис. 3. Схема для определения коэффициента формы включения κ_ϕ

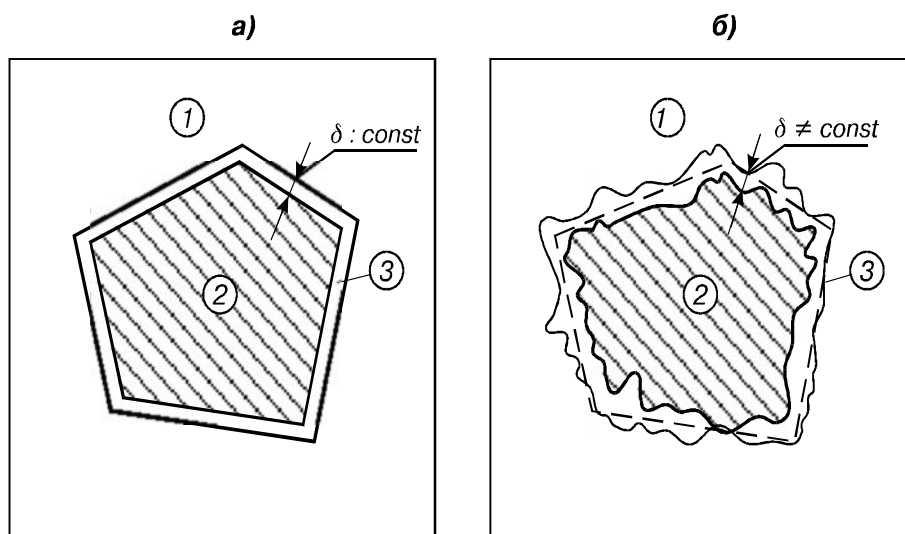


Рис. 4. Включения с постоянной (а) и переменной (б) шириной к.з.:

1 – матрица; 2 – включение; 3 – контактная зона

Таким образом, исходная макроструктура бетона моделируется пластиной единичной толщины (рис. 5), на поверхности которой расположены *НД* и выпуклые многоугольники, стороны которых имитируют к.з., а сами многоугольники – включения (рис. 5 а, б); для компонентов бетона на поверхности пластины расположены только *НД* макроструктуры (рис. 5 в). Статистически независимые геометрические Γ и физические Φ параметры макроструктуры бетона и его компонентов характеризуются совместной функцией распределе-

ния вероятностей $F(\Gamma, \Phi)$ или плотностью вероятностей $f(\Gamma, \Phi)$.

Значения геометрических параметров макроструктуры бетона $\Gamma = \Gamma(r_{\partial}, l_{0\partial}, \alpha_{\partial}, x_{\partial}, y_{\partial}, N_{\partial}, R_{\partial}, n_{\partial}, \theta_{\partial}, X_{\partial}, Y_{\partial}, \kappa_{\partial\partial}, \delta_{\partial}, \Delta_M)$ и его компонентов $\Gamma = \Gamma(r_{\partial}, l_{0\partial}, \alpha_{\partial}, x_{\partial}, y_{\partial}, N_{\partial})$ принимаются постоянными или случайными, отвечающие заданному закону распределения.

Физические параметры в модели бетона $\Phi = \Phi(M, B, K)$ для матрицы $M = M(E_M, \mu_M, k_{ICM}, k_{IIIM})$ являются постоянными, в для включений $B = B(E_B, \mu_B, k_{ICB}, k_{IIIB})$ и к.з. $k = k(\Delta_M)$ могут приниматься в зависимости от условий конкретной задачи постоянными или случайными величинами.

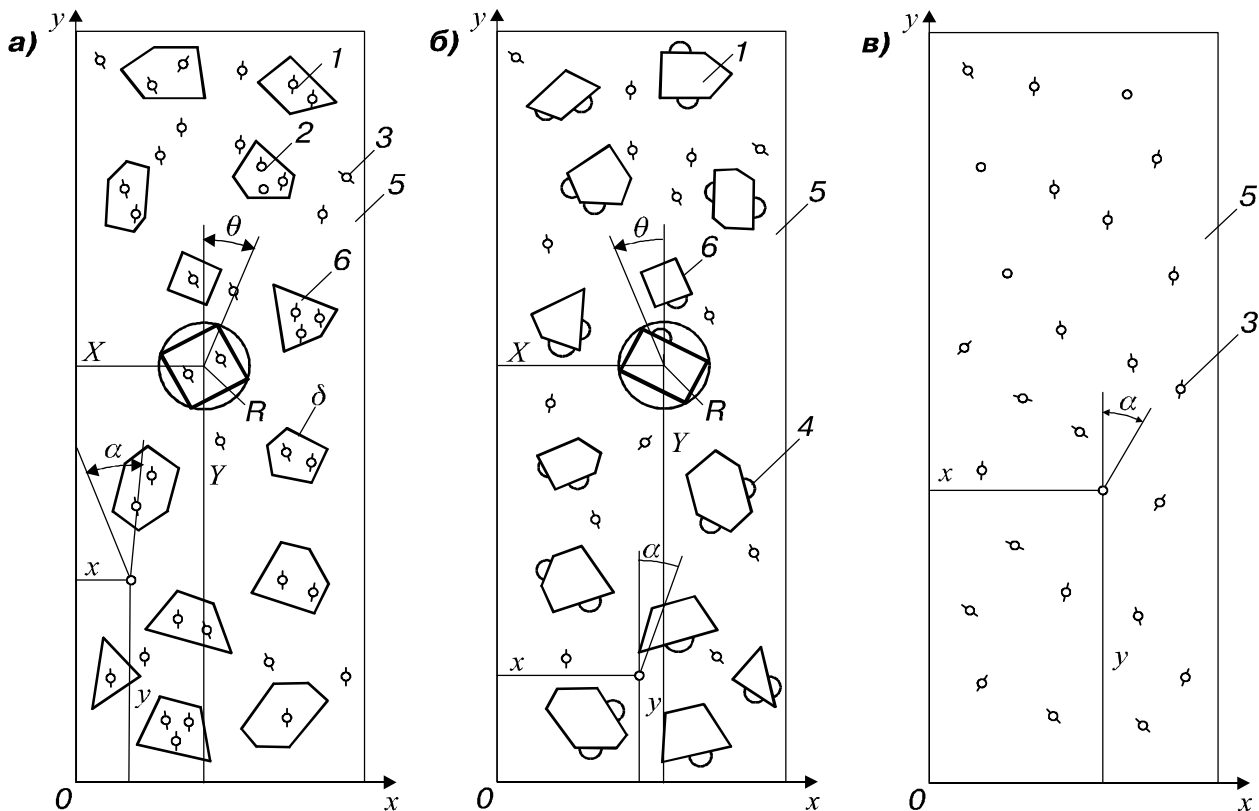


Рис. 5. Модель образцов бетона на пористых (а), плотных (б) заполнителях и компонентах их макроструктуры (в) – заполнителей и матрицы:

1 – включение; 2 – начальный дефект включения; 3 – то же матрицы;
4 – то же контактной зоны; 5 – матрица; 6 – к.з.

Присвоение элементам макроструктуры бетона и его компонентам значений параметров, подчиняющихся произвольному закону распределения, выполняется методом статистических испытаний (методом Монте-Карло).

Для этого кривая распределения, например, параметра C (рис. 6 а) представляется в виде гистограммы (рис. 6 б), которой ставится в соответствие шкала приведенных значений данного моделируемого параметра.

Шкала представляет собой интервал единичной длины, который разделен на отрезки $l_{i-1,i}$ прямо пропорциональные частотам моделируемого параметра C (рис. 6 в).

Далее по закону равномерного распределения случайных чисел на этом интервале единичной длины моделируют случайное число t , попадание которого на отрезок шкалы $l_{i-1,i}$ определяет значение параметра C^t .

Отметим, что значения моделируемого параметра C могут изначально задаваться не законом распределения, а в виде экспериментально установленной гистограммы распределения.

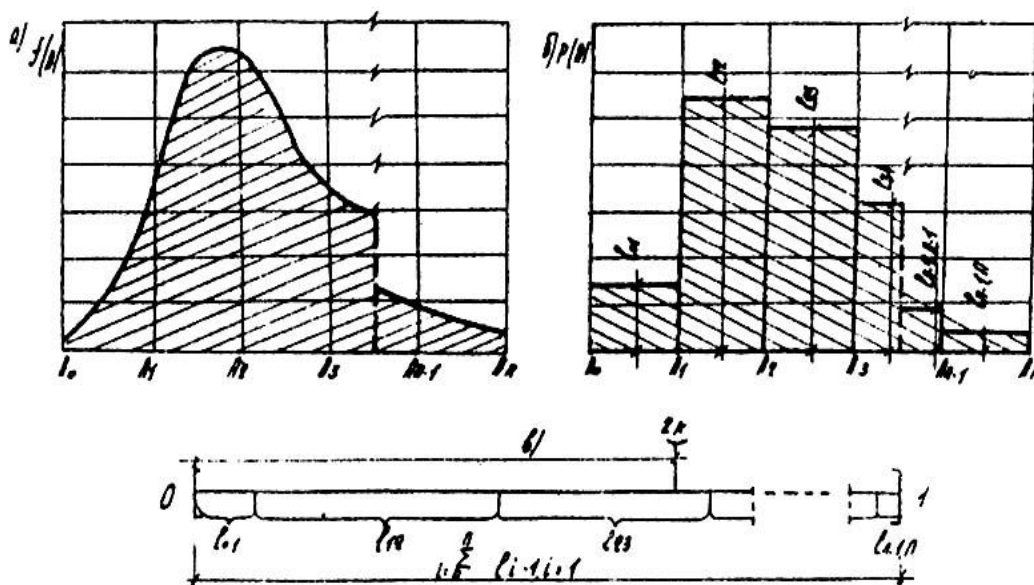


Рис. 6. Схема присвоения значений элементам макроструктуры бетона и его компонентам:
 а – кривая распределения значений параметра структуры C ; б – то же гистограмма;
 в – шкала приведенных значений параметра C

Геометрические характеристики параметров макроструктуры бетона устанавливали проведением НЭ. Форму крупного заполнителя – шлаковой пемзы, изучали на аншлифах бетона. Визуальными наблюдениями (рис. 7) было установлено, что практически все (около 96 %) контуры шлаковой пемзы выпуклы и, следовательно, могут быть описаны выпуклыми многоугольниками.

Статистическая обработка результатов четырехсот шестидесяти измерений показала, что 10 % сечений заполнителя могут быть описаны треугольниками, 50 % – четырехугольниками, 30 % – пятиугольниками и 10 % – шестиугольниками. На это соотношение практически не влияет вид, размер и

фракционный состав шлаковой пемзы.

Поровое пространство шлаковой пемзы характеризовали двумя показателями – распределением пор по условным диаметрам (диаметром $< 0,3$ мм – $42 \div 49$ %, $0,3 \div 0,5$ мм – $11 \div 15$ %, $0,5 \div 1,0$ мм – $21 \div 28$ %, $1,0 \div 2,0$ мм – $9 \div 14$ %, $2,0 \div 3,0$ мм – $0,1$ %, средний диаметр пор $0,55$ мм, пористость заполнителя – 28 %) и формой их сечения (содержание пор круглой формы – 28 %, эллиптической – 12 %, прямоугольной – 2 %, квадратной – $0,5$ %, треугольной – 4 %, гипоциклоидной с одной вершиной – 14 %, то же с двумя вершинами – 32 %, то же с тремя и более вершинами – $7,5$ %) на аншлифе.

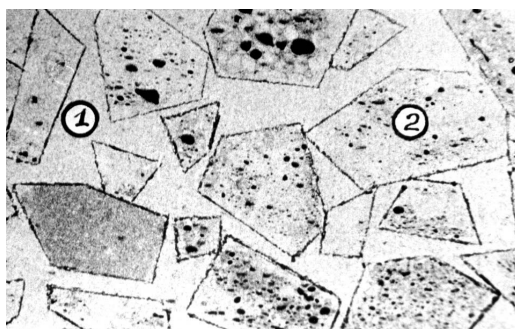


Рис. 7. Аншлиф бетона на пористом заполнителе:
1 – ЦПК; 2 – заполнитель

Аналогичные измерения выполнены для цементно-песчаного камня (ЦПК) для распределения пор по условным диаметрам (пор диаметром $1 - 25$ мкм – $7,4 \div 22,2$ %, $25 - 50$ мкм – $6,0 \div 28,0$ %, $50 - 100$ мкм – $35,1 \div 39,4$ %, $100 - 250$ мкм – $21,5 \div 27,8$ %, $250 - 500$ мкм – $3,7 \div 5,5$ %) и форме пор (содержание пор круглой формы – 9 %, эллиптической – 18 %, прямоугольной – 4 %, треугольной – 7 %, гипоциклоидной с одной вершиной – 19 %, то же с двумя вершинами – 24 %, то же с тремя и более вершинами – 19 %).

Из приведенных данных следует, что в основном (свыше 60 %) поры имеют форму окружности или гладкого контура с одним-двумя заостренными углами (типа гипоциклоиды).

Результаты измерений параметров к.з. шлаковой пемзы в бетоне показали, что ее ширина составляет в порах $18 - 640$ мкм, в межпоровых перегородках – $10 \div 5$ мкм, а ее прочность на $9 - 40$ % выше прочности ЦПК и ее параметры зависят как от химической активности поверхности заполнителя, так и от пористости: наличие сравнительно мощного контактного слоя цементного камня в порах шлаковой пемзы объясняется более благоприятными

(чем в межпоровых перегородках) условиями гидратации при скоплении в порах поглощенной влаги (рис. 8). При оценке дефектности структуры проведенные исследования показали, что в бетоне на гранитном щебне основная часть дефектов расположена в ЦПК и в месте его контакта с плотным заполнителем (рис. 9 а). В отличие от бетона на плотном заполнителе, в легком бетоне с приближением к поверхности пористого заполнителя наблюдается уменьшение пористости (дефектности) матрицы, которая в месте контакта в ультрафиолетовом свете просматривается в виде тонкой полоски, окаймляющей заполнитель. Основным дефектом таких бетонов являются поры, расположенные как в матрице, так и во включениях (рис. 9 б).

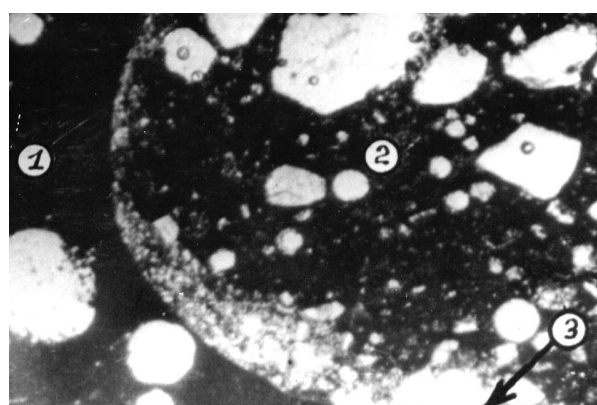
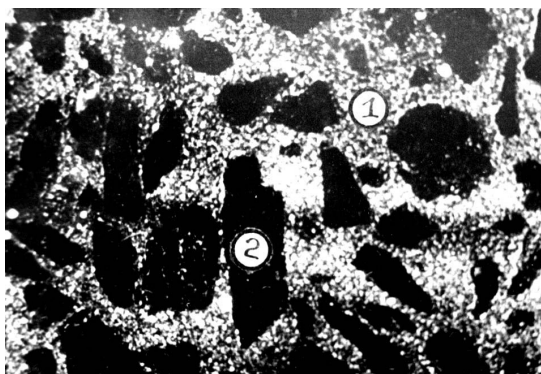
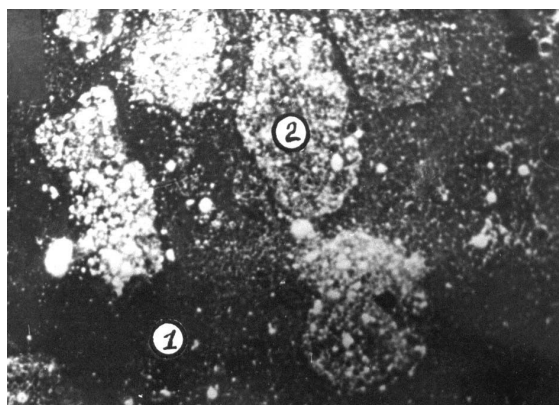


Рис. 8. К.з. в бетоне на пористом заполнителе (×25):

1 – заполнитель; 2 – ЦПК; 3 – высокоосновные гидраты кальция



а)



б)

Рис. 9. Люминисцентная дефектоскопия тяжелого (а) и легкого (б) бетона:

1 – ЦПК; 2 – заполнитель

Исследования зоны контакта шлаковой пемзы с ЦПК также подтверждают положение об отсутствии в ней дефектов, типичных для бетонов на плотных заполнителях. Как правило, из-за химического взаимодействия, ви-

зуально зона перехода “матрица-включение” в легком бетоне или трудно различима, или в ней наблюдается плотный контакт, обусловленный силами механического сцепления ввиду низкой химической активности участка шлаковой пемзы, или образование в поре своего рода буфера – скопления высокоосновных гидратов кальция.

Физические характеристики параметров модели бетона удобно представлять в виде полиномиальных моделей “состав – свойства” для ЦПК (матрицы) и регрессионных уравнений “средняя плотность – свойства” для шлакопемзового заполнителя (включений).

Математические модели (ММ) свойств ЦПК устанавливали методами планирования экспериментов с использованием в качестве варьируемых факторов: C – объемной концентрации цементного теста в растворе, отн. ед.; $(B/U)_{ист}$ – истинного водоцементного отношения, отн. ед., и R_a – активности цемента, МПа. Ниже приведены полученные полиномиальные модели свойств ЦПК при переменных в кодированном масштабе: прочности при сжатии R_M и растяжении R_{ppM} , начального модуля упругости E_M , коэффициента Пуассона μ_M , величины предельных относительных деформаций при сжатии $\varepsilon_{сжМ}$, критических КИН при нормальном отрыве k_{IcM} и плоском сдвиге k_{IIcM} , угла внутреннего трения ρ_M и коэффициента сцепления k_M :

$$R_M = 30,78 + 14,42x_1 - 2,19x_2 + 4,82x_3 - 13,36x_1^2 - 2,45x_1x_2 + 3,04x_1x_3 + 4,99x_2^2 + 0,86x_3^2 \text{ (МПа);} \quad (1)$$

$$R_{ppM} = 2,615 + 1,003x_1 - 0,447x_2 + 0,163x_3 - 0,675x_1^2 - 0,236x_1x_2 + 0,135x_2^2 - 0,025x_3^2 \text{ (МПа);} \quad (2)$$

$$E_M \cdot 10^4 = 1,748 + 0,164x_1 - 0,221x_2 + 0,122x_3 - 0,344x_1^2 - 0,026x_1x_2 + 0,202x_2^2 - 0,124x_3^2 \text{ (МПа);} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{сжМ} \cdot 10^{-5} = 243,4 + 99,2x_1 - 10,5x_2 + 2,7x_3 - 46,4x_1^2 - 5x_1x_2 - 14,5x_1x_3 + 13,1x_2^2 - 5,5x_2x_3 + 4,18x_3^2 \text{ (отн.ед.);} \quad (4)$$

$$\mu_M = 0,195 + 0,02x_1 - 0,015x_2 - 0,011x_3 + 0,001x_1^2 - 0,002x_1x_2 - 0,007x_1x_3 + 0,022x_2^2 + 0,009x_2x_3 - 0,006x_3^2 \text{ (отн.ед.);} \quad (5)$$

$$K_{IcM} = 0,466 + 0,088x_1 - 0,082x_2 + 0,012x_3 - 0,179x_1^2 - 0,030x_1x_2 - 0,015x_1x_3 + 0,024x_2^2 + 0,037x_2x_3 - 0,006x_3^2 \text{ (МН/м}^{3/2}\text{);} \quad (6)$$

$$K_{IIcM} = 8,518 + 4,548x_1 - 0,883x_2 + 1,643x_3 - 3,268x_1^2 + 0,485x_1x_3 + 1,322x_2^2 + 0,71x_3^2 \text{ (МН/м}^{3/2}\text{)}; \quad (7)$$

$$\rho_M = 54,52 + 5,66x_1 - 0,18x_2 + 1,17x_3 - 3,47x_1^2 - 0,45x_1x_2 - 0,59x_1x_3 + 2,83x_2^2 + 0,69x_2x_3 + 4,78x_3^2 \text{ (град.)}; \quad (8)$$

$$K_M = 5,28 + 1,95x_1 - 0,5x_2 + 0,28x_3 - 1,95x_1^2 - 0,24x_1x_2 + 0,53x_2^2 + 0,18x_3^2 \text{ (МПа)}; \quad (9)$$

ММ свойств включений бетона (шлаковой пемзы), полученные методами корреляционного анализа, приведены на рис. 10 (в числителе) с указанием числа единичных испытаний (в знаменателе).

Критический КИН при плоском сдвиге k_{IIc} для шлаковой пемзы определяли по уравнению [3]:

$$k_{IIc_B} = k_{Ic_B} R_{сжB} / 2 R_{ppB}, \quad (10)$$

после подстановки в которое k_{IcB} , $R_{сжB}$ и R_{ppB} окончательно находим:

$$k_{IIc_B} = 0,23 \rho_{mB}^{4,004} \cdot 10^{-12} \text{ (МН/м}^{3/2}\text{)}. \quad (11)$$

На рис. 10 д пунктирной линией показана зависимость модуля упругости включений при разрушении E_B^{np} , полученная из уравнения $E_B^{np} = R_{сжB} / \varepsilon^{np}_{сжB}$.

Видно, что разница между начальным модулем упругости E_B и E_B^{np} становится существенной при $\rho_{mB} > 1000 \text{ кг/м}^3$ и достигает 27 – 30 %.

Критические КИН k_{IcB} и k_{IIcB} характеризуют способность материала сопротивляться распространению в нем соответственно отрывных и сдвиговых трещин. По результатам экспериментов отношение этих коэффициентов k_{IIcB} / k_{IcB} для ЦПК составляет более 5 (уравнения 6 и 7), а для шлаковой пемзы – более 2 (оценка нижней границы – рис. 10 з), что определяет в основном отрывной механизм распространения трещин в бетоне.

С другой стороны, сравнение критических КИН при нормальном разрыве для шлаковой пемзы (рис. 10 з) и ЦПК (уравнение 6) показывает, что значения такого коэффициента для включений при $\rho_{mB} > 1500 \text{ кг/м}^3$ от 2 до 5 раз превышают аналогичный показатель для матрицы.

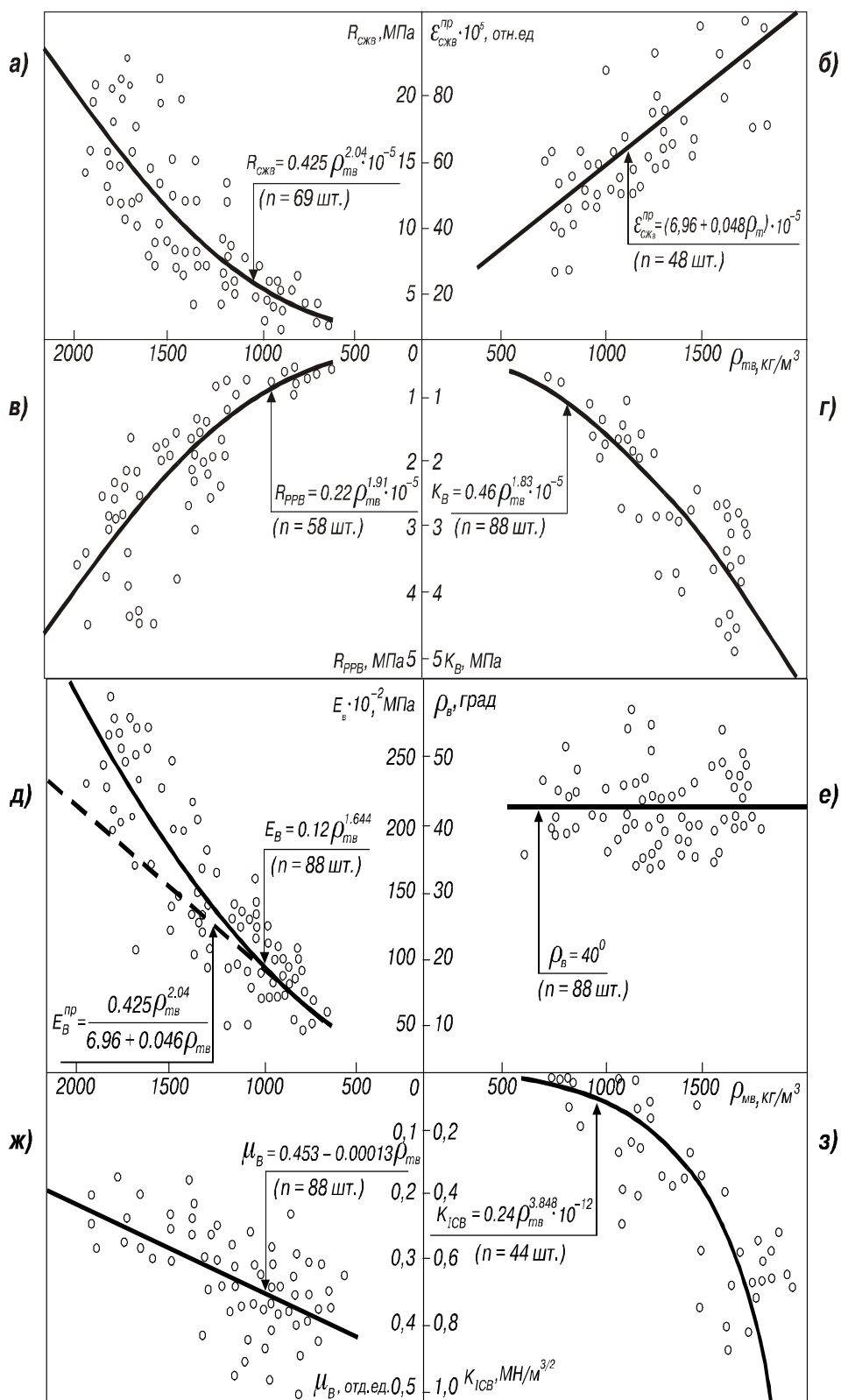


Рис. 10. Зависимость свойств включений от их средней плотности $\rho_{mв}$:

- а – прочность на сжатие; б – предельная сжимаемость;
 в – прочность на растяжение при раскалывании; г – коэффициент сцепления;
 д – модуль упругости; е – угол внутреннего трения; ж – коэффициент Пуассона;
 з – критический коэффициент напряжений при нормальном разрыве.

Следовательно, такие включения, являясь препятствием развивающимся трещинам, будут ими огибаться, что и приводит к образованию зигзаг-трещин.

На основании выполненных экспериментов структуру легкого бетона до приложения нагрузки (в статике) будем представлять в виде двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы (ЦПК) и включений (зерен пористого заполнителя) – выпуклых многоугольников. На границе матрицы и включений имеется контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала случайным образом расположены начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров. В тяжелом бетоне дефектностью включений можно пренебречь, так как она представлена в основном нарушением контакта гранитного щебня с ЦПК вследствие седиментационных явлений. Однако под нагрузкой бетон проявляет уже свойства динамичной системы, состояние которой изменяется во времени с момента приложения нагрузки вплоть до разрушения образца. Это обусловлено появлением нового структурного элемента – микро- и макротрещин.

Явления, происходящие под нагрузкой в многократно структурированных динамичных системах, относятся к процессам формирования иерархии структур, в основе которых лежат следующие принципы:

а) при формировании структуры на некотором уровне определяющим является локальное поле напряжений структурного элемента этого уровня и структурного элемента, соответствующего структуре предшествующего уровня;

б) формирование иерархии структур завершается на уровне структуры, неустойчивые элементы которой ограничены естественными границами материальной системы [4].

Исходя из этих положений, процесс разрушения будем моделировать на самом высоком уровне – на уровне макроструктуры бетона с включением структурных элементов данного (матрица, включения, контактная зона, макротрещины) и предшествующего (поля матрицы и включений, микротрещины) уровней. Тогда разрушение бетонного образца будет соответствовать моменту образования неустойчивого структурного элемента – магистральной трещины, выходящей на стороны образца.

При моделировании процессов разрушения бетонный образец рассматривается в виде пластины единичной толщины. При одноосном сжатии это не приводит к существенным погрешностям в сравнении с действительным

объемным напряжением состоянием элементов [2]. Кроме того, принятое упрощение позволит использовать для описания напряженного состояния структурных элементов бетона известные решения теории упругости на плоскости [5].

Полученные ММ свойств матрицы и включений использовали при формировании расчетной модели-аналога бетона на пористых заполнителях.

В качестве такой модели принята пластина единичной толщины шириной $A = 100$ мм и высотой $H = 400$ мм со следующими геометрическими и физическими характеристиками структурных элементов (рис. 5 а): количество НД структуры $N = 50$; законы распределения размеров НД структуры для матрицы r_M и включений r_e , принимаются по таблице; случайные величины координат центров НД (x_d, y_d) и включений (X_e, Y_e) равномерно распределены для x_d и X_e на интервале $[0; A]$, а для y_d и Y_e – на интервале $[0; H]$; закон распределения размеров включений R_e принимается по таблице; случайные ориентации НД α_d и вершин включений θ_e относительно нагрузки q равномерно распределены соответственно на интервалах $[-\pi/6; \pi/6]$ и $[0; 2\pi]$; законы распределения числа вершин включений n_e и ширины к.з. δ_k принимаются по таблице; физические характеристики матрицы определяются по ММ свойств ЦПК (1) – (9) при основном уровне варьируемых факторов: $C = 0,625$; $(B/C)_{уст} = 0,23$ и $R_a = 39$ МПа; физические характеристики включений устанавливаем из корреляционных уравнений (рис. 10 и рис.11)) при законе распределения ρ_{mB} , приведенном в таблице (при $\rho_{mB} = 1060$ кг/м³ и $\vartheta\rho_{mB} = 25$ %); относительная величина микротвердости к.з. составляет значение $\Delta_M = 1,087$; коэффициент формы включений $k_{\varphi e}$, подчиняется закону равномерного распределения в интервале $[1,2; 1,4]$; концентрация включений φ_e составляет 0,35.

**Геометрические характеристики элементов структуры модели-аналога
бетона на пористых заполнителях**

Показатели	Ранги/частоты показателей				
r_M , мкм	1-25/0,15	25-50/0,17	50-100/0,37	100-250/0,25	250-500/0,06
r_e , мм	0,01-0,3/0,5	0,3-0,5/0,13	0,5-1/0,25	1-2/0,09	2-3/0,03
R_e , мм	10-15/0,5	15-18/0,3	18-20/0,2	–	–
n_e , шт	3/0,1	4/0,5	5/0,3	6/0,1	–
δ_k , мкм	10-50/0,5	50-640/0,5	–	–	–
$\rho_{mB} \cdot 10^2$, кг/м ³	6-8/0,22	8-10/0,18	10-12/0,30	12-14/0,18	14-16/0,12

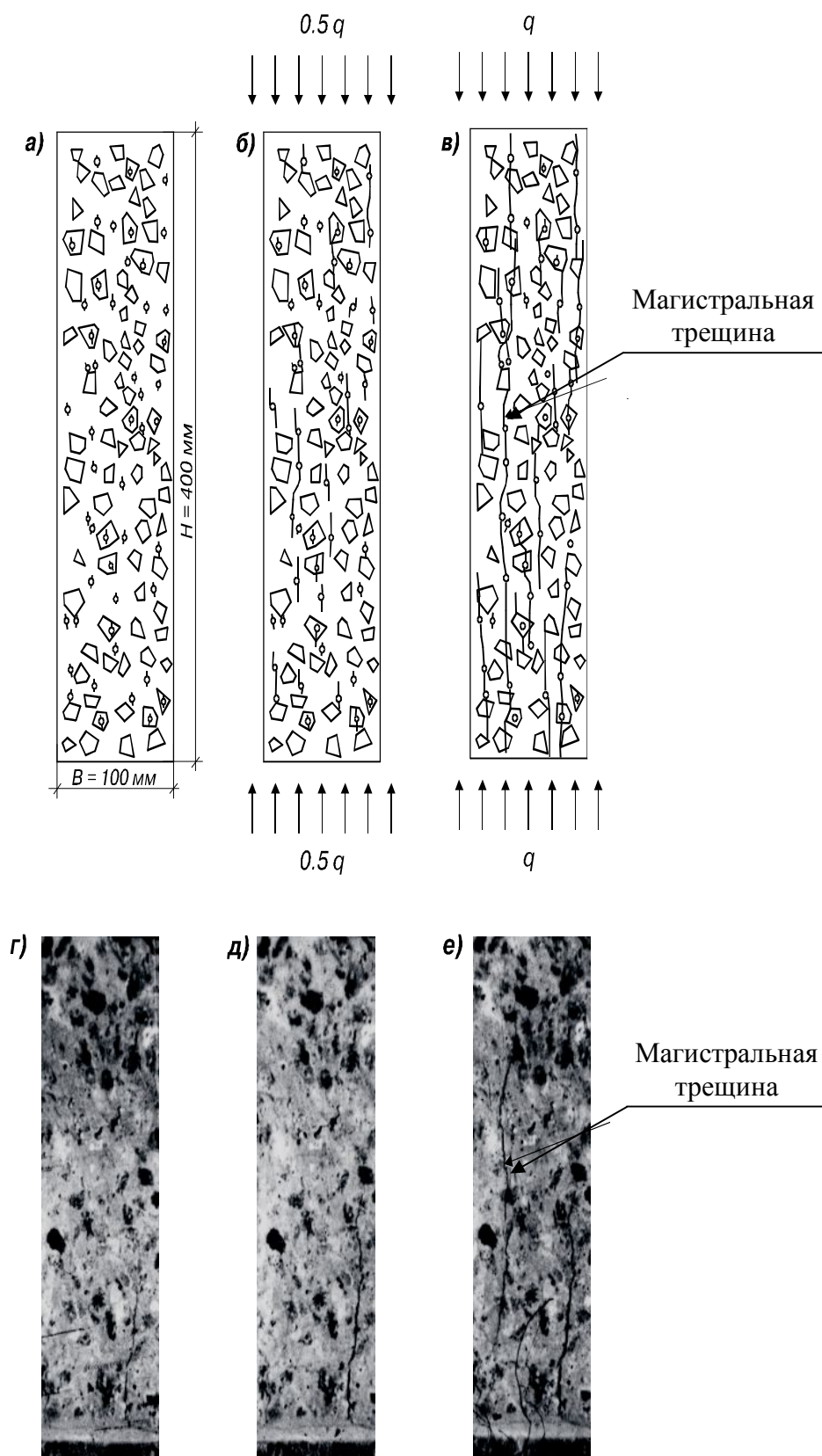


Рис. 11. Разрушение бетона на пористых заполнителях на модели-аналоге (а – в) и натурном образце (г – е)

Одна из реализаций развития трещин в модели-аналоге бетона на пористых заполнителях и, для сравнения, в натуральном образце приведена на рис. 11.

Таким образом, предложена имитационная модель бетона в виде двух-компонентной системы, состоящей из матрицы (*ЦПК*) и включений (зерен пористого заполнителя) – выпуклых многоугольников.

На границе матрицы и включений имеется контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала (в матрице и включениях) случайным образом расположены начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров.

В тяжелом бетоне дефектностью включений можно пренебречь и отнести ее к контактной зоне, так как она представлена в основном нарушением контакта гранитного щебня с *ЦПК* вследствие седиментационных явлений, проявляющихся при виброуплотнении бетонной смеси.

Под нагрузкой бетон проявляет свойства динамичной системы, состояние которой изменяется во времени с момента приложения нагрузки вплоть до разрушения образца, что обусловлено появлением нового структурного элемента – микро- и макротрещин.

Тем самым процесс разрушения моделируется на уровне макроструктуры бетона с включением структурных элементов данного (матрица, включения, контактная зона, макротрещины) и предшествующего (поля матрицы и включений, микротрещины) уровней. Тогда разрушение бетонного образца на модели в виде пластины единичной толщины соответствует моменту образования неустойчивого структурного элемента – магистральной трещины, выходящей на стороны образца, представляющих собой естественную границу для данной материальной системы на уровне макроструктуры.

Список литературы: 1. Чермашенцев В.М. Теоретические аспекты компьютерного моделирования эффективных композиционных материалов / В.М. Чермашенцев // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 3. – С. 33 – 40. 2. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю.В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с. 3. Черепанов Г.П. Равновесие откоса с тектонической трещиной / Г.П. Черепанов // Прикладная механика и математика. – 1976. – Т. 40, № 1. – С. 136 – 151. 4. Гольдштейн Р.В. Структуры разрушения. Условия формирования. Эшелоны трещин / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко. – М.: ИПП АН СССР, 1978. – 59 с. – (Препринт / Институт проблем прочности АН СССР; ИПП АН СССР, 1978-110. 5. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

Поступила в редколлегию 23.06.10